

Analóg és hírközlési áramkörök II. laboratórium

7. Modulációk mérése

Helyszín: T.A216 laboratórium

Szükséges eszközök:

SG1501B AM/FM szignálgenerátor
DG2041A (Rigol) függvénygenerátor
SM5011 spektrumanalizátor
HM400 (Hameg) oszcilloszkóp
DS1054 (Rigol) digitális oszcilloszkóp

Ismerkedjen meg a mérőműszerek kezelésével a honlapon található útmutatók segítségével!

Bevezető

Modulációnak azt nevezzük, amikor egy jel (*vivő*) valamely fizikai tulajdonságát egy információhordozó jellel (*moduláló jel*) arányosan változtatjuk. Az ellentétes folyamatot demodulációnak hívjuk, vagyis amikor visszanyerjük az információt. A villamosmérnöki gyakorlatban a vivő lehet vezetett jel (elektromos áram) vagy sugárzott jel (elektromágneses sugárzás - rádiósugárzás, optikai sugárzás), de természetesen más fizikai jelenség/mennyiség is modulálható (pl. hang, ld. emberi beszéd).

A moduláció célja többszörös lehet:

- az információ nagy távolságra való átvitelének (esetleg valamilyen konkrét közegen (médiumon) való átvitelének) lehetővé tétele (pl. a hangfrekvenciás tartomány EM sugárzása nem célszerű)
- az egy közegen / útvonalon átvihető információ mennyiségének növelése (általában több független információfolyam párhuzamos átvitele; pl. frekvenciaosztással)
- az információ titkosítása (bár ez alapvetően a kódolások témakörbe tartozik, de egy bonyolultabb moduláció is hozzájárulhat)
- az átvitel során védelem a zajtól, zavarástól, egyéb hatásoktól

Főbb analóg moduláció típusok (aszerint, hogy milyen mennyiséget, paramétert modulálunk):

- Amplitúdó moduláció (AM, amplitude modulation)
- Frekvencia moduláció (FM, frequency modulation)
- Fázismoduláció (PM, phase modulation)

Ha a moduláló jel digitális (leginkább bináris), akkor ezeknek a megfelelőit

- ASK (amplitude shift keying)
- FSK (frequency shift keying)
- PSK (phase shift keying)

néven is illetik (a keying szó itt kb. kapcsolgatást, billentyűzést jelent, a morze-billentyűre (morse-key) utalva (a távíró átvitel az ASK legegyszerűbb fajtája)). Léteznek kombinált modulációk is (pl. a QAM tekinthető az AM és PM, ill. ASK és PSK kombinációjának); továbbá az egyéb paraméterek szerint vannak változatok (pl. a jel folytonossága, spektruma szerint stb.).

A moduláció leggyakoribb célja a nagyobb frekvencián való átvitel lehetővé tétele, ilyenkor a vivő szinuszos hullám. A transzponálás (felkeverés) előtti, vagyis a nulla frekvencia közelében lévő jelet alapsávi jelnek is hívjuk. Digitális jelek esetén ez úgy néz ki, hogy egy négyszögjelre ültetjük az információt, ez is tekinthető modulációnak (de a kódolások témakörben is foglalkozunk vele). A négyszögjelnél pl. a következő paramétereket lehet modulálni:

- Amplitúdó (bár itt a moduláció kifejezés talán túlzás)
- Frekvencia vagy periódusidő (azonos kitöltési tényező mellett) (PFM, pulse frequency modulation)
- Impulzusszélesség vagy kitöltési tényező (azonos frekvencia mellett) (PWM, pulse width modulation avagy PDM, pulse duration / duty cycle modulation)

Utóbbiaknál többféle megvalósítása lehetőség van a többi paraméter szerint, illetve többféle elnevezés létezik.

Az egyes moduláció fajták között különbséget tehetünk aszerint is, hogy (ugyanazon moduláló jel mellett) mekkora sáv szélességet foglalnak el, illetve azt milyen hatékonyan használják ki; mennyire zavarvédettek; mennyire könnyen demodulálható stb. Így pl. az AM általánosságban jóval zavarérzékenyebb, mint az FM és PM (ezeket együtt szögmodulációnak is nevezik, mivel a szinuszfüggvény paraméterei), ugyanis a zaj leginkább az amplitúdót változtatja, ami az utóbbi típusoknál állandó (erről erősítő és határoló áramkörök gondoskodnak).

I. Amplitúdó moduláció (AM)

1,AM-DSB

Elmélet

Amplitúdómoduláció (AM, amplitude modulation) esetén a vivő amplitúdóját (vezetett jel esetében a feszültségét) változtatjuk a moduláló jellel arányosan. Főbb fajtái:

- AM-DSB (Double Sideband, azaz két oldalsáv), pl. középhullámú rádiós műsorszórás (Kossuth rádió 540kHz)
- AM-DSB-SC (Suppressed Carrier, azaz elnyomott vivőjű két oldalsáv)
- AM-SSB-SC (Single Sideband Supressed Carrier, azaz egy oldalsáv elnyomott vivőjű), pl. légiforgalmi vagy rádióamatőr forgalmazás
- AM-VSB (Vestigial Sideband, elnyomott/csökkentett oldalsávú), analóg tv adás
- ASK (Amplitude Shift Keying) a digitális változata (moduláló jel digitális)
- OOK (On-Off Keying, „ki-be kapcsolás”), előbbinek a legegyszerűbb változata, pl. optikai távközlésben, vagy morze adásban (100% modulációs mélységű bináris ASK)
- QAM (Quadrature Amplitude Modulation), az AM és a PM kombinációja, főleg nagysebességű digitális átvitelnél használják (pl. digitális tévé)

Az AM-DSB-SC jelet matematikailag legegyszerűbben szorzással állíthatjuk elő. Legyen $u_m(t)$ a moduláló jel (az átviendő információ) és $u_v(t)=U_v\cos(\omega_v t)$ vivő; U_v a vivő csúcsértéke, ω_v a vivő körfrekvenciája (angol irodalomban ω_c , mint carrier). Az egyszerűség kedvéért legyen a moduláló jel egy szinusz: $u_m(t)=U_m\cos(\omega_m t)$. (A valós modulációt, pl. emberi beszéd vagy zenét modellezhetjük egy olyan jellel, aminek a spektruma kb. négyszög alakú adott frekvenciatartományban.)

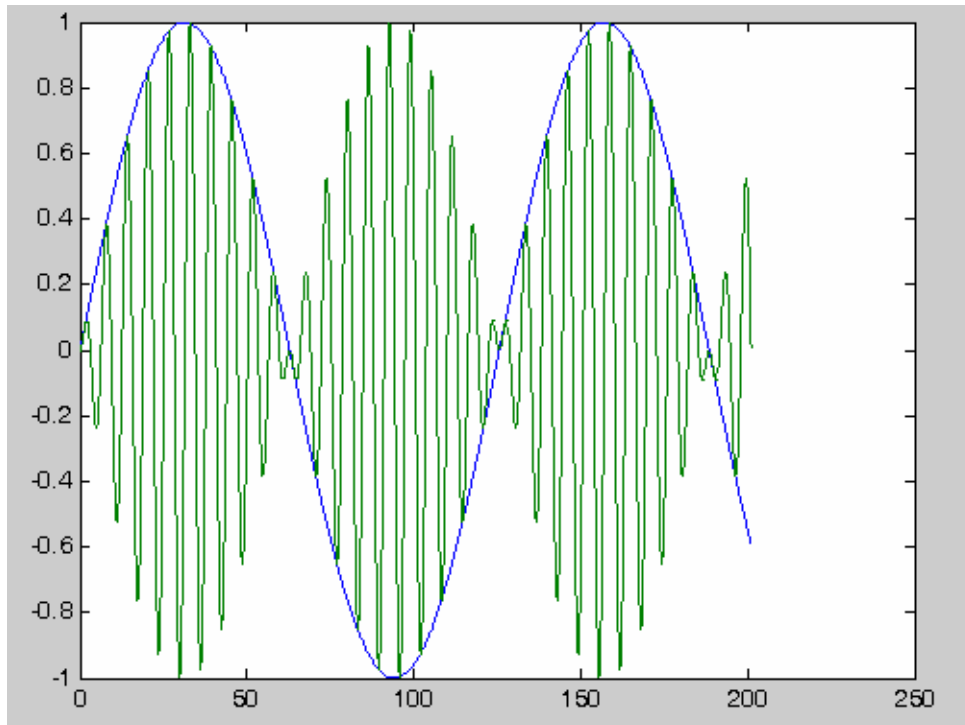
A modulált jel a moduláló jel és a vivő szorzata lesz:

$$u_{am}(t) = u_m(t) \cdot u_v(t) = U_m U_v \cos(\omega_m t) \cdot \cos(\omega_v t) = \frac{U_m U_v}{2} [\cos(\omega_v + \omega_m) + \cos(\omega_v - \omega_m)]$$

(Felhasználva az összeg szögekre vonatkozó trigonometrikus azonosságot.)

Ebből az derül ki, hogy a modulált jel spektrumában két komponens lesz, $\omega_v - \omega_m$ és $\omega_v + \omega_m$, vagyis a tiszta szorzással való előállításnál a vivő nem jelenik meg.

Kérdés: mi történik, ha $\omega_v < \omega_m$?



1. ábra AM-DSB-SC jelalak (zöld) és moduláló jel (kék)

Az AM-DSB előállítás matematikailag hasonló, csak a moduláló jelet el kell tolni egyenszinttel:

$$u_m(t) = 1 + U_m \cos(\omega_m t).$$

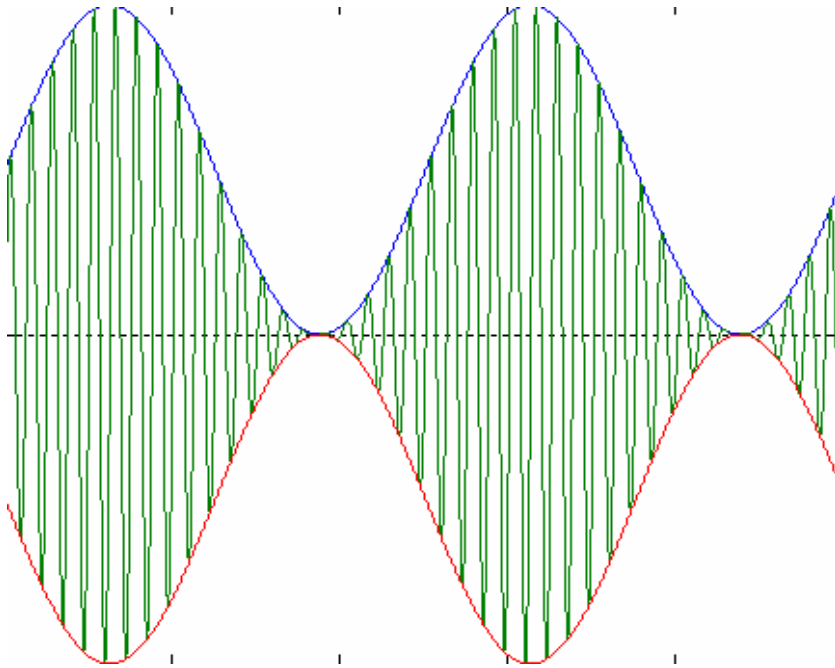
Ekkor a szorzat:

$$\begin{aligned} u_{am}(t) &= u_m(t) \cdot u_v(t) = U_v \cos(\omega_v t) + U_m U_v \cos(\omega_m t) \cdot \cos(\omega_v t) = \\ &= U_v \cos(\omega_v t) + \frac{U_m U_v}{2} [\cos(\omega_v + \omega_m) + \cos(\omega_v - \omega_m)] \end{aligned}$$

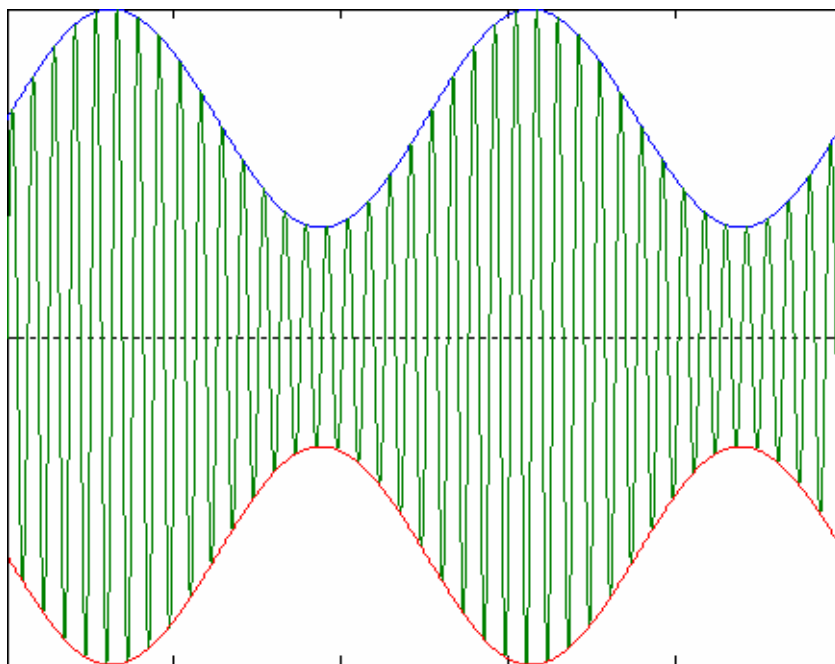
A spektrumban megjelenik a vivő és a két oldalsáv a vivőtől egyenlő távolságra és egyenlő nagysággal. A moduláló jel és a vivő csúcsértékének arányától függ az eredményül kapott jelalak, ezt a modulációs mélységgel (vagy modulációs indexszel) számszerűsítjük:

$$m = \frac{U_m}{U_v} \cdot 100\%$$

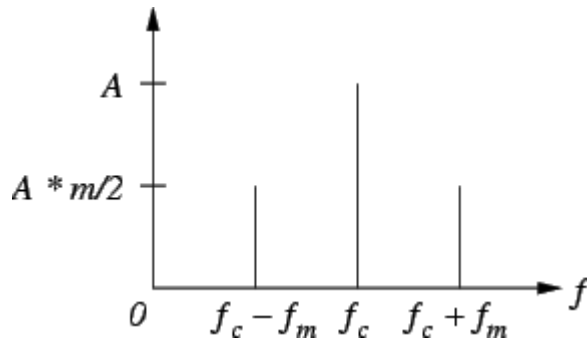
ahol U_v a vivő csúcsértéke, U_m a moduláló jel maximuma (utóbbi betartásáról határoló áramkörök gondoskodnak). Ha a két maximum egyenlő, a modulációs mélység 100%. Csökkentve m -et, a moduláció egyre kevésbé látszik a vivőn. Ha $m=0\%$, az azt jelenti, hogy a moduláció nincs rajta a vivőn. Ha pl. egységnyi a vivő csúcsértéke és egységnyi a moduláló maximuma, a 2. ábra kapjuk, ahol a burkológörbe maximuma 2-nél, a minimuma 0-nál lesz. Ha U_m a fele a vivőének, $m=50\%$, akkor a 3. ábra kapjuk. Itt a burkológörbe maximuma 1,5-nél, a minimuma 0,5-nél lesz.



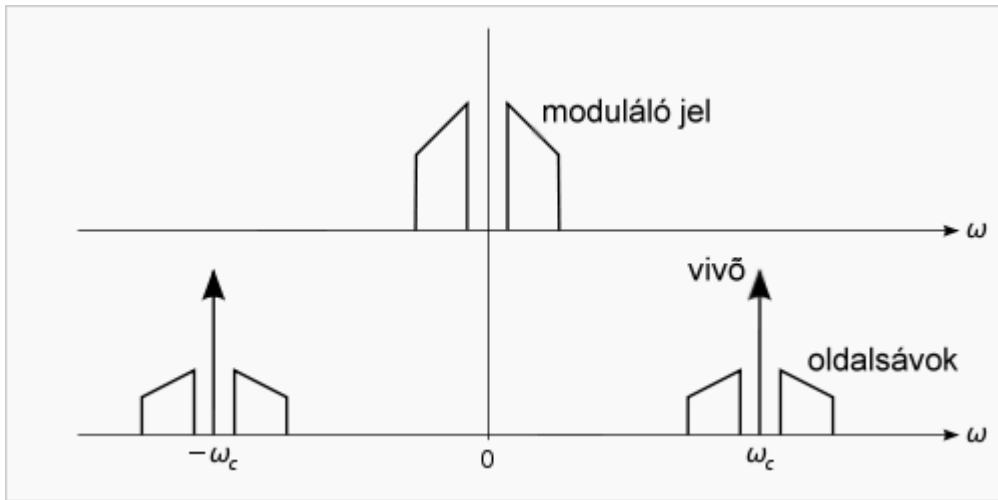
2. ábra AM-DSB jelalak (zöld) 100% modulációs mélységnél, moduláló jel (kék)



3. ábra AM-DSB jelalak (zöld) 50% modulációs mélységnél



4. ábra AM-DSB spektruma szinuszos moduláció esetén, 100% modulációs mélységnél, ideális esetben (végtelenül kis analizátor sáv szélesség mellett)



5. ábra AM-DSB spektruma (alul) sávhatárolt moduláló jel esetén

AM-DSB-nél tehát három komponens van a spektrumban (4. ábra, 5. ábra). $m=100\%$ mellett a két oldalsáv energiája fele lesz a vivőének. Kisebb modulációs mélység esetén az oldalsávok energiája csökken. Energetikailag az AM-DSB rossz hatásfokú, mert a szükséges információt egy oldalsáv is tartalmazza, azaz az energia háromnegyed részét meg lehet spórolni, ha AM-SSB-SC (egy oldalsáv, elnyomott vivőjű) modulációt használunk. Az AM-DSB előnye az, hogy a vivőre könnyű ráhangolni és könnyű demodulálni (pl. egyszerű diódás burkolódetektorral), ez főleg a rádiózás korai időszakában volt fontos. A középhullámú adások (pl. nálunk az 540 kHz-es Kossuth) máig ilyen üzemmódban sugároznak. AM-SSB-SC-t használnak pl. repülésben és rádióamatőr forgalmazásban, ezeknek a demodulációja bonyolultabb, viszont nem csak energiát spórolnak, de a szükséges sáv szélesség is kisebb (vagyis több csatorna fér el ugyabba a frekvenciatartományba). (Az 5. ábraán megjelennek a negatív frekvenciák is, ezek a Fourier-transzformáció szükséges matematikai kellékei, a fizikai valóságban nem értelmezzük. Hasznosak viszont a két oldalsáv megjelenésének magyarázatában: az alapsávi moduláló jelnek (felső rész az ábrán) van egy tükörképe a negatív tartományban, és ezek együtt kerülnek feltranszponálásra a vivő köré, avagy a negatív frekvenciájú komponens átmegegy a pozitív tartományba.)

Mérési feladat

a) AM-DSB jelalak bemutatása a Rigol függvénygenerátorral

Használhatjuk bármelyik oszcilloszkópot.

A generátor output feliratú kimenetét kössük az oszcilloszkóp egyik csatornájára, a sync feliratú kimenetét pedig a szkóp trigger bemenetére és állítsuk a szkópot external trigger módba. A generátoron menjünk be a Utility almenübe (a hasonló nevű gomb megnyomásával). Ha az egyik menüpont Sync off –ot ír, állítsuk át Sync on –ra az alatta lévő gombbal (ez engedélyezi a trigger kimenetet; ami a moduláló jellel szinkron négyszögjel, enélkül elég nehéz a szkópon a modulációt megjeleníteni).

A függvénygenerátoron válasszuk ki a sine (szinusz) üzemmódot a bal alsó gombsorral. A megjelenő menü segítségével állítsuk be a frekvenciát 10kHz-re. Állítsuk be az amplitúdót pl. 5Vpp-re (menüben AMPL). Engedélyezzük a kimenetet a csatlakozó melletti OUTPUT gombbal. Ellenőrizzük a vivő meglétét a szkópon.

Nyomjuk meg a MOD gombot (jobb felső részen). Az így megjelenő menüben válasszuk ki az AM-et a Type almenüből. A Depth almenüben a modulációs mélységet állíthatjuk be (0..120%), elsőre válasszunk 100%-ot. Az AMFreq almenüben a moduláló frekvenciát válasszuk 1kHz-nek. Állítsuk be a szkópon a moduláló jelnek megfelelően az időalapot (0,2ms vagy 0,5ms javasolt).

Az oszcilloszkópon az első ábrához hasonló jelalaknak kell látszódnia. A Shape almenüben a moduláló jelalakot is kiválaszthatjuk. Hasonlóképp a vivő jelalakját is állíthatjuk, ezt a bal alsó gombsorral. Próbáljuk ki a különböző vivő (szinusz, négyszög, fűrész) és moduláló jelalakokat (szinusz, négyszög, háromszög), valamint szinuszos jel esetén a különböző modulációs mélységeket (pl. 20%, 50%, 100%) és dokumentáljuk az eredményt és vessük össze az elméleti/számolt várakozással! Oszcilloszkópon mérésrel ellenőrizzük a modulációs mélységet a különböző beállításoknál! Ellenőrizzük a vivő és moduláló jel frekvenciáját is!

Kísérletezzünk a moduláló frekvenciával is. Mi történik, ha elkezdjük a vivő frekvenciához közelíteni? Mit látunk a szkópon, ha pl. 1,1kHz moduláló frekvenciát állítunk be? (Miért?)

b, Spektrum

Az SG1501B szignálgenerátoron állítson be $f_v=2\text{MHz}$ vivőfrekvenciát, $U_{cs}=50\text{mV}$ amplitúdót, $m=60\%$ modulációs mélységet és $f_m=400\text{Hz}$ moduláló frekvenciát és amplitúdómodulációt.

(Bal felül AM gomb; 400Hz feliratú gomb balközépen; a kék shift plusz a kék << és >> gombokkal válthatunk az egyes paraméterek állítása között, zöld led jelzi az aktuálisan állítható paramétert.)

A kimenő jelet vizsgálja oszcilloszkópon. Mivel jelen esetben a vivőfrekvencia jóval nagyobb a moduláló jelénél (a gyakorlatban is inkább így szokott lenni), ezért az oszcilloszkópon a vivő összemosódik.

Állítsa át a modulációs frekvencia beállítást külsőre (external, EXT) és kössön a függvénygenerátorról $f_m=300\text{kHz}$ szinuszjelet az external bemenetre (kb. $3V_{pp}$ amplitúdóval). Ilyenkor az oszcilloszkópon ránézésre csak a vivőt látjuk.

Vizsgálja meg a jel spektrumát. Ábrázolja a jegyzőkönyvben a spektrumot, mérje meg az egyes komponensek frekvenciáját és relatív amplitúdóját. A spektrumanalizátort állítsa 0,5MHz/div vagy kisebb értékű frekvenciaalapra. Az analizátor képernyőjén mindig látható

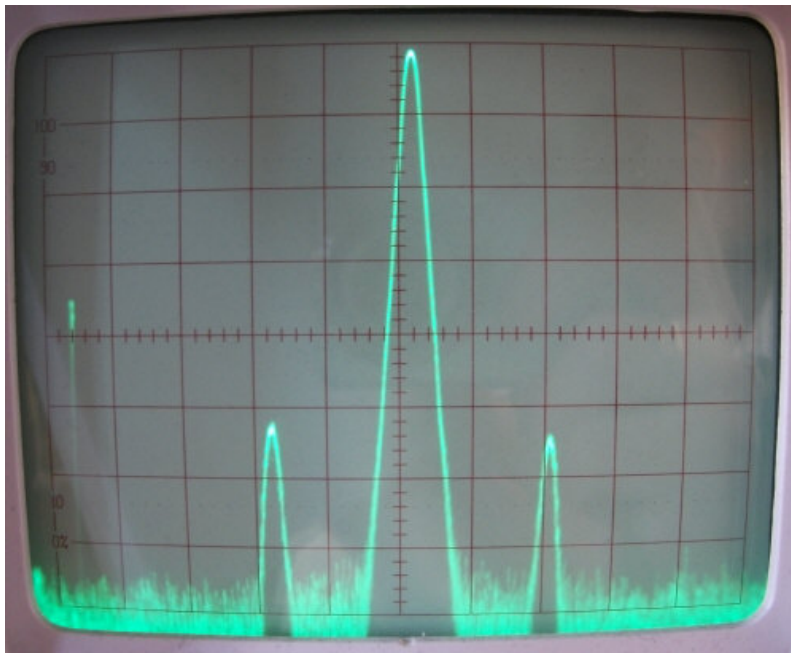
egy nagy csúcs a 0 frekvenciánál (ez tehát nem a jel része), és egy kicsit tőle balra a negatív frekvenciatartományból is mutat. Használjuk a Center freq. és a Fine potikat a méréshez. Szükség esetén (ha felül „kilóg” a jel) használjuk az analizátor 10dB-es bemeneti csillapítót (gombokkal egyenként beállítható).

Megfigyelhetjük, hogy a spektrumban megjelennek a felharmonikusok (és nem csak a párosak) (nem ideális a jel).

A spektrum vizsgálata közben állítsa el a moduláló jel frekvenciáját, illetve amplitúdóját, valamint a modulációs mélységet. Mit tapasztal? Használhatja a függvénygenerátor sweep funkcióját is.

Mekkora a legkisebb modulációs frekvencia, amelyik még látható a vivő mellett a spektrumanalizátoron? Hasonlítsa össze a spektrumanalizátor (előlapon feltüntetett) sávzélességével. Próbálja ki a másik sávzélesség állásban is.

Az SM5011 analizátor 400kHz és 20kHz sávzélesség beállítással rendelkezik. Jelen esetben ez alatt azt értjük, hogy egy ilyen sávzélességű szűrővel pásztázza végig a frekvenciatartományt. Emiatt az ideális szinuszjel spektruma nem egy függőleges vonalként (Dirac-delta) fog látszódni, hanem pont ennek a szűrőnek a spektrumát adja vissza. Minél kisebb ez a sávzélesség, annál finomabban tuduk végigpásztázni a spektrumot, annál pontosabban adja vissza a spektrumot (cserébe tovább tart a pásztázás). A szignálgenerátor beépített modulációs frekvenciája max 1kHz, ami jóval kisebb az analizátor sávzélességénél, ezért az oldalsáv nem lenne megkülönböztethető a vivőtől, ezért van szükség a külső modulációra.



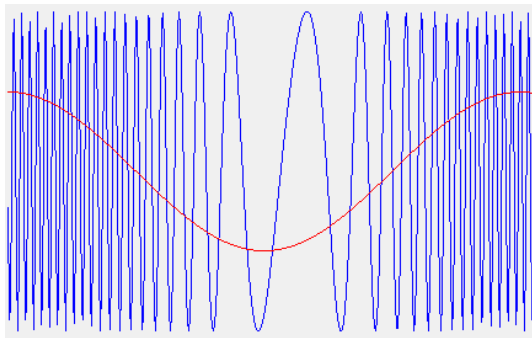
6. ábra AM-DSB spektruma az analizátoron (középen a vivő)

Ezenkívül van egy video filter opció (bizonyos analizátorokon video bandwidth néven), amelyet bekapcsolva átlagolást (mozgóátlagot) kapcsol a jelre, így csökkentve a zajt. Ilyenkor előfordulhat, hogy az „uncal” / “uncalibrated” piros jelző LED villog, ezzel jelezve, hogy ebben a beállításban nem kalibrált (nem pontos) a mérés (nem is annyira frekvenciában – ahol eleve 100kHz pontossággal tudunk csak mérni – hanem a teljesítmény spektrális eloszlásában, amit most nem kívánunk pontosan mérni).

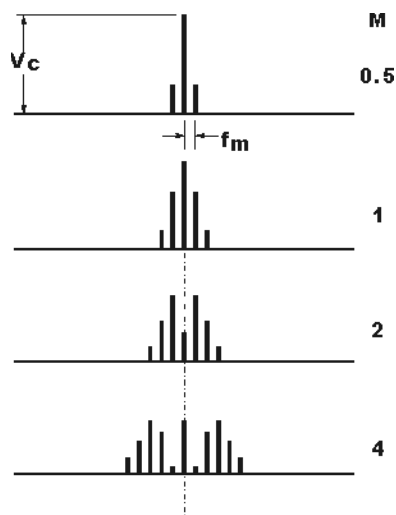
II. Frekvencia moduláció (FM)

Elmélet

Frekvenciamoduláció esetén a vivő frekvenciáját változtatjuk a moduláló jel amplitúdójával arányosan. A keletkező jel amplitúdója (csúcsértéke) tehát állandó marad. Ez azért jó (AM-mel szemben), mert így maximálisan kihasználjuk az adó energiáját. Továbbá az információ a frekvenciában van, amit úgy is tekinthetünk, hogy a jel nullátmeneteiben, amit a ráakódó zaj kevésbé befolyásol, mint az amplitúdót. (Gondoljuk végig, hogy egy szinuszhullám nullátmeneténél nagyon meredek, ha az egyes pontbeli értékei megnőnek vagy csökkennek, akkor a meredekség miatt csak nagyon kicsit mozdul el a hullám oldalirányban.) Tehát az FM (és hasonlóan a PM) sokkal kevésbé zajérzékeny, mint az AM. A zajvédettséget tovább is lehet fokozni azzal, ha az eredő jel sáv szélességét jóval nagyobbra választjuk, mint a moduláló jel sáv szélessége volt, ilyenkor úgynevezett demodulációs nyereségünk keletkezik (ami viszont csak a jelre vonatkozik, nem a zajra).



7. ábra FM jelalak koszinusz moduláció esetén



8. ábra Az FM spektruma a modulációs index függvényében.

Mérési feladatok

a,

Az SG1501B szignálgenerátoron állítson be $f_v=2\text{MHz}$ frekvenciát 50mV amplitúdóval. Állítsa a modulációt FM-re. Állítsa a frekvencialöketet (bal második paraméter kijelző) $f_d=50\text{kHz}$ -re és állítson be külső modulációt (external). A függvénygenerátorból adjon $f_m=300\text{kHz}$ $U_{cs}=3\text{V}$ szinuszjelet.

Vizsgálja meg a jel spektrumát! Ábrázolja a spektrumot a jegyzőkönyvben és tüntesse fel az oldalsávok frekvenciáját és relatív nagyságát! Hasonlítsa össze a mértéket az elméletből tanultakkal!

Állítsa el a modulációs frekvenciát mindkét irányban és vizsgálja meg, hogyan változik a spektrum! Vizsgálja meg a frekvencialöket hatását is!

Vizsgálja meg a jelalakot oszcilloszkópon! (Ez bizony nem igazán lerajzolható...)

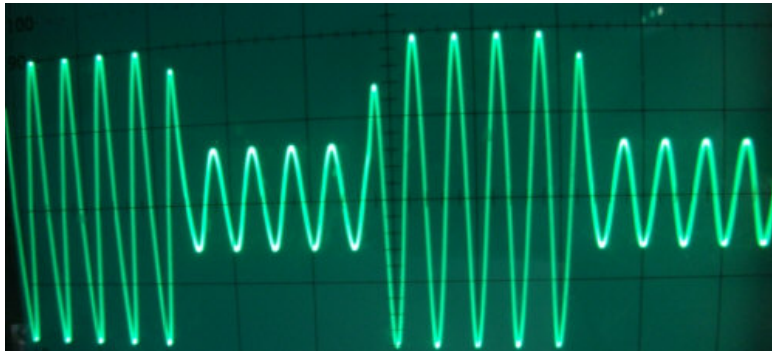
b, FM vizsgálata a Rigol generátoron

Az AM-nél elmondottakhoz hasonlóan járjunk el ($f_v=10\text{kHz}$, $f_m=1\text{kHz}$), csak most a MOD menüben a Type alatt válasszuk az FM-et. A Deviat a frekvencialöketet állítja (deviation), a FMFreq a moduláló frekvenciát. Vizsgáljuk a jelalakot oszcilloszkópon.

Kísérletezzünk 10kHz vivő mellett az 1..10kHz tartományban a lökettel és a moduláló frekvenciával. Dokumentáljuk és magyarázzuk az eredményt két löket érték mellett (pl. 2kHz, 10kHz).

III. Digitális modulációk, jelalakok és kódolások

1. Bináris ASK



9. ábra ASK jelalak

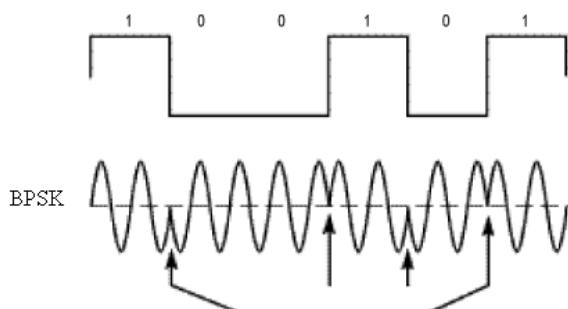
A Rigol generátoron állítson be 10kHz vivőt. A MOD menüben válassza Type alatt az AM-et, Shape alatt pedig a Square-t (négyzet moduláció). Az AMFreq a moduláló jel frekvenciája, válasszon 1kHz-et. (Ha a vivő egész számú többszöröse a moduláló frekvenciának, akkor a „legszebb” a jel, próbálja ki, miért! (Állítsa el a frekvenciát.) Továbbá a vivőhöz közeli moduláló frekvencia lehetővé teszi, hogy az oszcilloszkópon a váltásokat és a vivőt is jól lássuk. A gyakorlatban a vivő jóval magasabb frekvenciájú szokott lenni a moduláló jelnél, kivéve az ún. ultra-wideband (ultra széles sávú) jeleknél.)

Válasszon modulációs mélységnek (Depth) különböző értékeket (50%, 100%). Ha $m=100\%$, a legegyszerűbb bináris modulációt kapjuk, ezt OOK-nak is szokták nevezni (On-Off Keying, ki-be kapcsolgatás, eredetileg „billentyűzés”). Ezt használják pl. a morze adásokban (itt CW-nek is hívják, continuous wave), vagy az optikai átvitelnél (ahol a frekvencia vagy fázismoduláció jelenleg még nagyon bonyolult). Az OOK-n kívüli ASK módokat ritkán használják.

2. Bináris PSK (B-PSK) (Binary Phase Shift Keying)

Elmélet

PSK esetén a vivő fázisa diszkrét értékeket vehet fel, bináris esetben legcélszerűbben 0 és 180 fokot. Az ilyen jel demodulációja nem egyértelmű, a vevő ugyanis nem tudhatja, melyik fázisállapot a nulla. A vivő helyreállítását (a fázis eltalálását) általában az üzenet elején egy bevezető (tréning) bitsorozat segítségével végzik el, amit az adó és a vevő előre egyeztet. Ha a vevő az inverzét vette, egyszerűen megfordítja a fázisokat. Ha az üzenet nem tetszőleges (nem mindegyik szimbólum engedett), az is segítheti a vivő helyreállítását.



10. ábra BPSK jelalak

Mérési feladatok

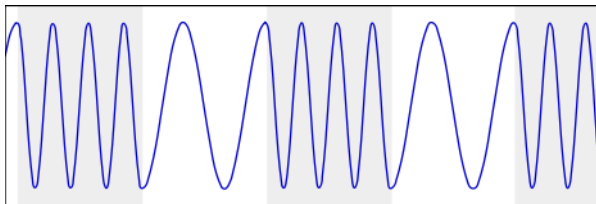
A Rigol generátoron állítson be 10kHz vivőt. A MOD menüben válassza Type alatt a PM-et. PMFreq beállításnak 2kHz moduláló frekvenciát (célszerű, ha a moduláló frekvenciának egész számú többszöröse a vivő, erre kis kísérletezéssel rájöhethetünk). A Deviat beállításnál állítsunk be 90° fázistolást. A Shape alatt állítsunk be négyszögjelet (Square). Ebben az esetben igazából $\pm 90^\circ$ -ot fogja a belső moduláló jel tolni, így valójában 180 fokos ugrások lesznek a jelben. Így pl. 5kHz moduláló frekvencia mellett minden szinuszhullám végén fázisugrás látható.

Dokumentálja a látottakat. Mérje ki a fázisugrást az oszcilloszkóp segítségével! Mérje ki a modulációs frekvenciát!

3. Bináris FSK (B-FSK) (Binary Frequency Shift Keying)

A Rigol generátoron állítson be $f_v=200\text{kHz}$ frekvenciát $U_{cs}=1\text{ V}$ amplitúdóval. Válassza az FSK modulációt.

Állítson be $f_r=50\text{kHz}$ ugrási frekvenciát (hop frequency). Így a bináris FSK során 200kHz és 50kHz között fog ugrálni. Bitsebességnek (FSK rate) állítson be $f_r=25\text{kHz}$ -et. Az oszcilloszkópon $20\mu\text{s}/\text{div}$ állás mellett jól látható az FSK jellege. Mérje ki szkópon az egyes vivő frekvenciákat valamint a moduláló frekvenciát (ez most az FSK rate)!



11. ábra Bináris FSK jelalak

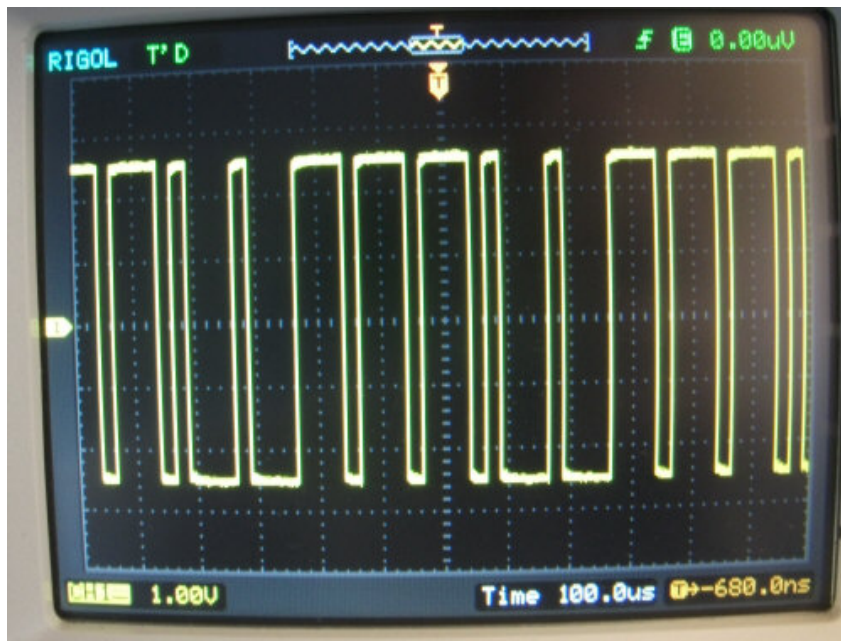
A spektrumanalizátoros vizsgálathoz állítsa át a vivőt 2MHz-re (a Sine gomb megnyomásával visszatérhetünk abba a menübe).

4. Impulzus-szélesség moduláció

Elmélet

A PWM-et leginkább vezérlésre használják. Ehhez általában azt a tulajdonságát használjuk ki, hogy aluláteresztő szűrőn átküldve a kimenő közel egyenjel szintje arányos lesz a PWM kitöltési tényezőjével. Ezt a szűrést a feszültség-csökkentő kapcsolóüzemű tápegységeknél LC taggal végezzük. DC motorok meghajtásánál a motor tehetetlenségi nyomatéka végzi az átlagolást. Elektromos fűtésnél a hőkapacitás (pl. vasaló fémtalpa, mikrohullámú sütő esetén az étel hőkapacitása). Lámpák (pl. LED-ek) esetében a szemünk átlagol.

A PWM jelet egy kapcsolóelemmel könnyű előállítani és szabályozni. A PWM-es vezérlések előnye a jó hatásfok, erről a kapcsolóüzemű tápegységek témakörben tanulhattunk. PWM-et használnak az ún. szervómotorok vezérlésére is, itt kivételesen nem közvetlen hajtásról van szó, hanem a motor vezérlőelektronikája dekódolja a jelet (ezt legegyszerűbben nullátmenet számolással és időzítéssel lehet).



12. ábra PWM jelalak bináris modulációnál

Mérési feladat

Állítson elő PWM jelet a Rigol generátorral. Állítson be vivőnek négyszögjelet a Pulse opcióval (csak ennél működik a PWM moduláció). Ilyenkor a MOD menüben automatikusan PWM üzemmód jelenik meg. A DtyDev (Duty Cycle Deviation) opcióval lehet a kitöltési tényezőnek a maximális változását beállítani (itt pl. a 25%-ot jelenti, hogy az 50%-oshoz képest $\pm 25\%$ -ot tér el, azaz bináris (négyszög) moduláció esetén 25% és 75% lesz a D). A Shape almenüben a moduláló jelalakot választhatjuk ki, pl. négyszögjelet és szinuszjelet. A jelet célszerű lehet digitális oszcilloszkópon megjeleníteni, ugyanis a nagy felfutási meredekség miatt az analóg műszeren a függőleges él nem látszódnak. Másik lehetőség, ha a Pulse menüben az Edge opciónál kissé megnöveljük a felfutó (és lefutó) él időtartamát, ekkor az analóg szkópon is megfigyelhető lesz az él (pl. 1kHz vivő mellett 5 μ s él időtartam már látszik a szkópon, de még mindig közel függőleges). (A Pulse menüben van még egy DtyCyc (duty cycle) beállítás, ezzel a vivő kitöltési tényezője állítható, ezt hagyjuk most 50%-on.)

a) Állítson be $f_0=1\text{kHz}$ vivőfrekvenciát. Állítson be 100 μ s felfutó él időtartamot (Edge opció). Mérje ki szkópon a felfutó és lefutó él hosszát (megegyeznek-e a beállított értékkel?). A későbbi mérésekhez állítsa vissza az élhosszt minimálisra.

b) A MOD menüben állítson be $f_m=200\text{Hz}$ moduláló frekvenciát (f_0 továbbra is 1kHz). A Shape opciónál Square (négyszögjel modulációt) állítson be. DtyDev=25%. Ne felejtse el a szkóp külső triggerjelét megadni az előzőekhez hasonlóan.

Vizsgálja meg a kimenő jelet szkópon. Mérje meg a kitöltési tényezőt a logikai 0 és 1 állapotokhoz tartozóan is. Igazolja, hogy a DtyDev beállítást hogyan kell értelmezni.

c) Állítson be Shape-nek Sine-t (szinuszt).

Vizsgálja meg a kimenő jelet szkópon.

A méréshez adott aluláteresztő (RC) tag (BNC-BNC csatlakozós) segítségével szűrje meg a kimeneti jelet és az eredményt vizsgálja meg szkópon. Vizsgálja meg a jelenséget $f_0=1\text{kHz}$,

10kHz és 50kHz vivőfrekvenciák mellett is! Ha a kimeneti szinuszjelre ráül a vivő, mérje meg ennek a hatásnak a mértékét!

5. Alapsávi négyszögjel vizsgálata

Mérési feladat

Állítson elő $f=1\text{kHz}$ négyszögjelet a Rigol függvénygenerátorral és vizsgálja meg a spektrumát!

Ehhez használja a digitális oszcilloszkóp FFT (digitális Fourier transzformáció) lehetőségét! (Math menü, Operator: FFT, Operation: On). Állítsa a Hz/Div értéket 1kHz-re vagy ehhez közelire. A Center opció az analóg spektrumanalizátorhoz hasonlóan használható, csak itt a függvény kirajzolása a nulla frekvenciától indul.

Jegyezze fel az első kilenc felharmonikus frekvenciáját és az alapharmonikushoz képesti relatív nagyságát (az analizátoron egy függőleges osztás 10dB-nek felel meg; vegye az alapharmonikust 0dB-nek). Hasonlítsa össze az eredményt a négyszögjel spektrumáról tanultakkal!

Ellenőrző kérdések

1. Rajzoljon fel egy 50% modulációs mélységű AM-DSB jelalakot szinuszos moduláció esetén!
2. Írja fel előbbinek a függvényét képlettel!
3. Rajzolja fel egy AM-DSB jel spektrumát, ha a moduláló jel spektruma 300 Hz és 3000 Hz között egyenletes és a vivő 540kHz-es!
4. Definiálja a modulációs mélységet AM-nél általános esetben!
5. Mik az FM előnyei és hátrányai az AM-hez képest?
6. Rajzoljon fel egy bináris PSK jelalakot!
7. Rajzoljon fel egy bináris FSK jelalakot!
8. Rajzoljon fel egy PWM jelalakot négyszögjel moduláció esetén!
9. Milyen probléma lép fel a PSK modulált jelátvitel során és hogy oldják meg?
10. Rajzolja fel egy négyszögjel spektrumát! Jelölje a frekvenciakomponensek relatív értékét!